

固-液导流筒搅拌槽内流体流动和颗粒悬浮特性

陈文民, 黄雄斌, 高正明

(北京化工大学化学工程学院, 北京 100029)

摘要: 在直径 0.8 m 的导流筒搅拌槽内, 对单相液体的三维速度分布、固-液两相的固体颗粒浓度分布和离底悬浮特性进行了系统的实验研究. 结果表明, 导流筒内外的轴向液相速度远大于径向和切向速度, 导流筒外壁附近存在一个与主体轴向流动方向相反的二次流区域; 搅拌槽底部结构对固体颗粒的临界离底悬浮转速(N_{JS})有显著的影响, 浅锥底的 N_{JS} 比平底的低 14% 以上; N_{JS} 随固相浓度的增加而增加, 但当浓度超过 50% 时, N_{JS} 略有降低; 槽内固相浓度分布的均匀性随固相浓度的增加而得到改善. 本研究结果对导流筒搅拌槽的优化设计具有一定的指导意义.

关键词: 导流筒搅拌槽; 液相速度分布; 固相浓度分布; 临界离底悬浮转速

中图分类号: TQ027.32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2007)01-0014-05

1 前言

带导流筒搅拌反应器广泛应用于多种工业生产过程中, 如有色冶金、化工、生物及环保等领域. 这种结构的搅拌反应器最早是由巴秋卡槽^[1]发展而来. 导流筒搅拌槽结构较简单, 一般由槽体、导流筒及叶轮 3 部分组成, 导流筒是用于引导流体流入和流出的圆形导管. 长期以来, 对固-液搅拌槽的研究主要是针对开式搅拌槽^[2,3], 所用搅拌桨型式一般为轴流式下压操作, 此结构的搅拌槽内存在着一个流体流动的转向区域, 转向区的存在降低了固-液悬浮的效率, 在搅拌槽内加入一个导流筒可有效地将向下流动的流体与向上流动的流体隔开. 与开式搅拌槽相比, 导流筒搅拌槽内的轴向速度分布更均匀, 在相同的功率消耗下产生更大的循环流量, 可有效提高导流筒搅拌槽反应器内上下浓度和温度的均匀性^[4].

虽然导流筒搅拌槽与开式搅拌槽相比有诸多优点, 但其研究相对较少^[5]. Oldshue^[1]从工业应用出发对导流筒搅拌槽的固-液悬浮特性进行了研究; Landberg^[6]对导流筒的再悬浮进行了研究; Weetman^[7]利用“凹槽”抑制导流筒叶端位置的回流, 大大提高了水力效率; 汪洋等^[8]对不同的导流筒直径、喷嘴直径和喷嘴位置对液固循环反应器中固体流动行为的影响进行了考察; 肖建军等^[9]对导流筒搅拌槽的循环特性进行了实验研究. 导流筒搅拌槽内流场及工业过程中常见的高固相浓度下固体的悬浮特性等尚未见报道. 为此, 本工作对导流筒搅拌槽内液相的速度分布、高固相浓度下(最高达到 54%) 固体颗粒的浓度分布及离底悬浮特性进行了研究, 为工业导流筒搅拌反应器优化设计提供参考.

2 实验装置及测试方法

本工作采用的实验装置为透明的有机玻璃平底导流筒搅拌槽, 如图 1 所示. 槽内径 $T=0.8$ m, 液位高度 $H=1.5$ m, 导流筒内径 $D_1=0.3T$, 筒高 $H_1=1.3T$, 入口为喇叭形. 搅拌桨采用三宽叶翼形下压式轴流桨 WH-3(见图 2), 直径 $D=0.95D_1$. 搅拌桨叶片结构为仿机翼形, 这种结构的搅拌桨可在相同的机械能输入条件下产生最大的循环流量和最小的流体剪切. 为消除导流筒内流体的打旋, 导流筒上方配置引流板, 搅拌桨下方配置导流板. 由于从导流筒流出的流体以轴向流动为主, 速度的切向分量很小, 一般导流筒搅拌槽内无需再设置挡板^[1], 本工作所用的导流筒搅拌槽内也未设置挡板. 实验所用的固相是平均粒径 $d_p=100 \mu\text{m}$ 的玻璃珠, 液相为自来水.

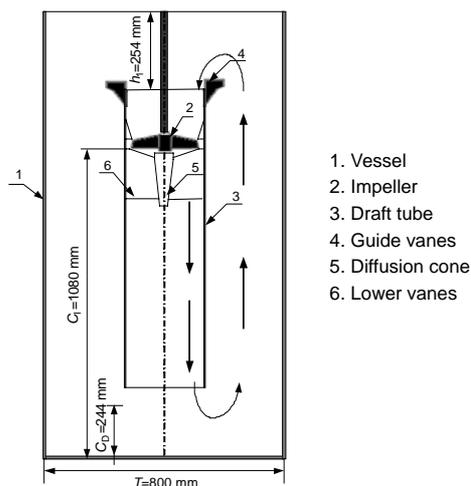


图 1 实验装置示意图
Fig.1 Experimental rig



图 2 WH-3 搅拌桨
Fig.2 WH-3 impeller

单相液体的三维速度采用五孔毕托管测速仪测量。毕托管的测量探头是直径 5 mm 的不锈钢球，球面上开有 5 个直径 0.35 mm 的测压孔，每个测压孔通过不锈钢细管与微压计相连，通过测定测压孔间的压差可计算出该测量点的三维速度。在搅拌槽和导流筒侧壁水平位置开若干测量孔，水平放置的五孔毕托管穿过测量孔测定不同轴向和径向位置处的液相速度，液相速度的测点分

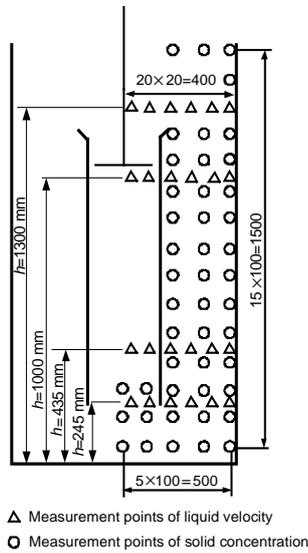


图 3 测量点分布图
Fig.3 The distribution of measurement points

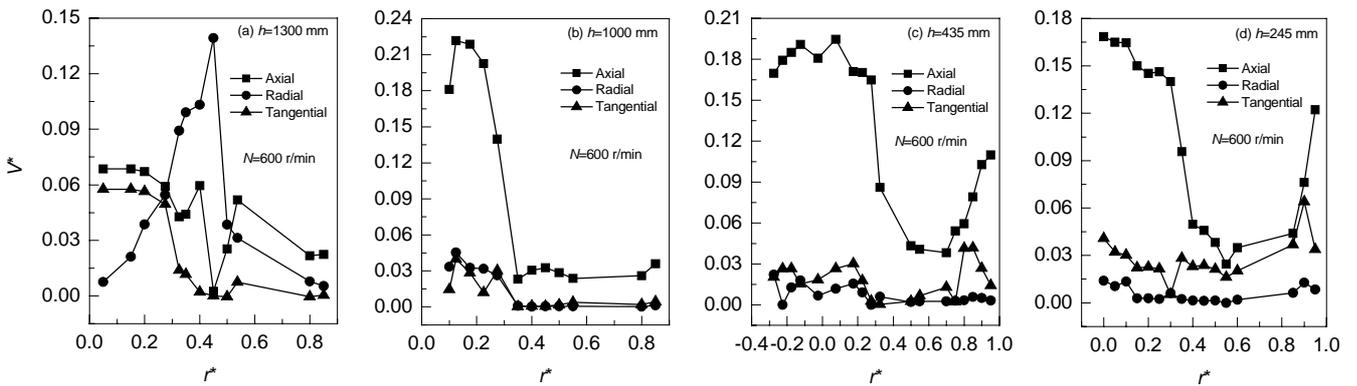


图 4 轴向、径向和切向速度分布
Fig.4 Axial, radial and tangential velocity distributions

不同高度的轴向速度 V_a^* 分布如图 5 所示。图中用竖线来表示导流筒筒壁位置，“+”表示速度向上，“-”表示速度向下。从图可以看出，在不同的高度处，除了

布如图 3 所示。固相浓度的测定则采用 GD-11 红外浊度仪^[10]，该测定仪主要由光电传感器及显示仪表构成，光电传感器由红外光源和光强检测器构成，红外光源和光强检测器之间的距离即光程为 5 mm，其工作原理是当固定光程和液体介质时透射光强度与固体颗粒的浓度具有固定的关系曲线即工作曲线，据此可实验测定不同条件下的固相浓度。从严格意义上来说，所得固相浓度测量值是 5 mm 弦长上的平均值，由于相对搅拌槽尺寸该光程很短，可近似认为是某一点的局部浓度。

3 结果及讨论

3.1 液相速度分布

实验测得的速度 V 与转速 N 成正比，为了便于比较，在作图时采用无因次量。横坐标用无因次半径 r^* ，纵坐标用无因次速度 V^* ，即

$$r^* = r/R, \tag{1}$$

$$V^* = V/V_t, \tag{2}$$

$$V_t = \pi ND. \tag{3}$$

实验测定了 4 个不同高度处的轴向、径向和切向速度分布，如图 4 所示。从图可以看出，除了导流筒入口处外 ($h=1300$ mm)，导流筒内轴向速度远大于径向和切向速度，导流筒外轴向速度也明显大于径向和切向速度。因此导流筒有效地限定了循环路径，减少了短路机会，在导流筒内外形成较强的轴向循环流动，提高了导流筒搅拌槽内流体的循环效率，从而改善了整个搅拌槽反应器内部液相温度及固相浓度分布的均匀性。随着搅拌转速的增加，液速是接近线性增加的。

在导流筒入口上方附近[图 5(a)]外，搅拌转速对无因次速度的影响较小，随着搅拌转速的增加，无因次液相速度略有下降。众所周知，液体的循环流量 $Q=N_QND^3$ ，而

液相速度 $V_a \propto ND$, 因此从理论分析来看某一点的无因子速度与转速无关, 但由于随着转速的增加, 流体速度加快, 流动阻力增加, 无因次速度将略有下降。

图 5(a)为导流筒入口上方位置的轴向速度分布, 从图可以看出, 其轴向速度的绝对值明显小于其他位置。这是由于在入口处流体改变方向, 轴向速度转换为切向和径向速度, 再从喇叭口流入导流筒。图 5(b)为搅拌桨下方位置的轴向速度分布, 从图中可以清楚地看出, 轴向速度的极值点在 $r^*=0.1$ 处, 偏离了导流筒的中心位置。这主要是由于搅拌桨下面装有引流装置所致。从图 5(c)和 5(d)可以看出, 导流筒外流体的轴向速度主体向上,

但在靠近导流筒壁附近有一个向下流动的区域。考虑到实际工业应用的需求, 导流筒的横截面积仅占搅拌槽横截面积的 9%, 远小于导流筒外的环隙面积, 在导流筒外侧必存在二次循环流。在离底 435 mm 处轴向速度向下的面积占环隙面积的 30%, 而在离底 245 mm 处轴向速度向下的面积则占到 46%, 这是由于导流筒流出的液体形成强烈轴向射流, 带动导流筒出口外流体向下流动, 使筒外流体分成两股, 一股沿导流筒外侧与搅拌槽内壁之间向上, 从导流筒上边缘进入导流筒; 另一股则沿导流筒外侧壁面向下形成二次循环流。

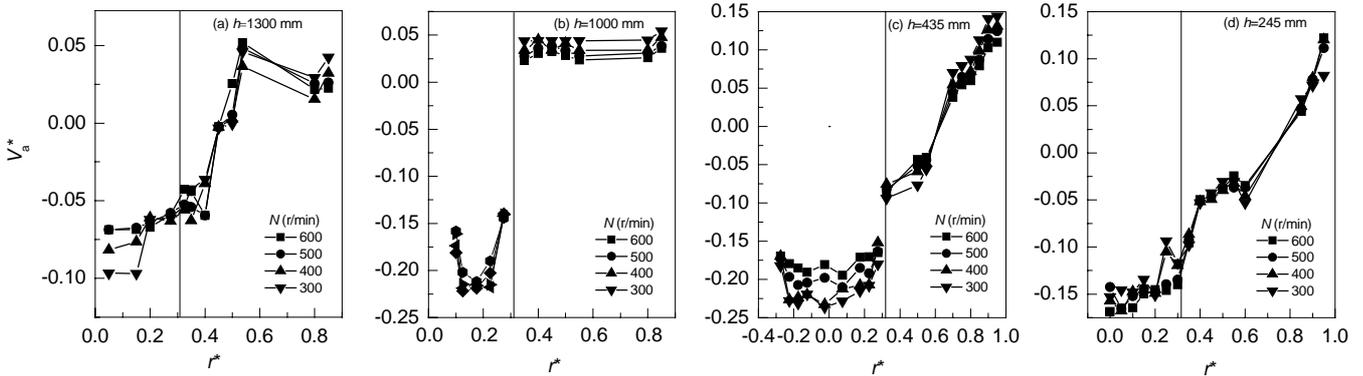


图 5 轴向液相速度分布图
Fig.5 Axial liquid velocity distributions

3.2 临界离底悬浮转速 (N_{JS})

N_{JS} 是指所有的固体颗粒在槽底的停留时间不超过 1~2 s 时的搅拌转速^[1]。对于平底槽, 可观察到最后被悬浮的固体颗粒多集中在槽底部的边缘处。为此, 本工作通过把搅拌槽底部改为浅锥形来降低 N_{JS} 。固相质量浓度在 8%~30% 及不同槽底部形状下临界离底悬浮转速的实验结果如表 1 所示。可见浅锥底搅拌槽的 N_{JS} 明显低于平底搅拌槽, 其值平均降低 14% 以上, 且对应的临界离底悬浮搅拌功率可降低 48% 以上。

表 1 不同底部结构离底悬浮转速和功率的比较

C_{av} (% ω)	8	13	18	23	30
N_{JS} (flat bottom) (r/min)	544.7	575.0	584.7	588.3	595.8
N_{JS} (shallow conical bottom) (r/min)	455.5	486.9	494.3	515.2	522.5
Decreased percentage of N_{JS} (%)	19.6	18.1	18.3	14.2	14.0
Decreased percentage of power (%)	71.0	64.7	65.5	48.9	48.3

图 6 描述了 2 种不同槽底形状时固相浓度与 N_{JS} 的关系。从图可以看出, 不同的固相浓度区域, 临界离底悬浮转速随固相浓度的变化规律不同。低固相浓度时,

N_{JS} 随固相浓度的提高而增加较快; 高固相浓度时, 随浓度的提高 N_{JS} 增加相对减缓。在实验中同时还发现, 当固相质量浓度达到 50% 时, N_{JS} 略有下降, 与文献[1]的结论相符。这是由于随着固含率的增加, 一方面, 由于液相中粒子的密集程度增加, 而粒子在密集状态下的沉降速度 $u_s = u(1 - \phi_v)^{4.65}$ (其中 u 为单个粒子的沉降速度, $1 - \phi_v$ 为空隙率)^[1]。由于固体颗粒干扰沉降的作用, 颗粒的沉降速度在密集状态时小于单颗粒状态; 另一方面,

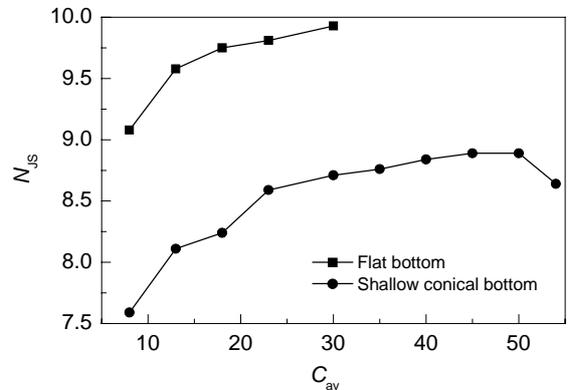


图 6 固相浓度对临界离底悬浮转速的影响
Fig.6 The effect of solid concentration on N_{JS}

当固体颗粒流经旋转的桨叶时，与液体一起获得速度。固含率低时固体颗粒受到的力主要是液体的曳力、本身的重力及其颗粒之间的摩擦力；随着固含率的增大，固体颗粒在叶轮区受到桨叶的碰撞增加，将获得更大的速度，从而导致了在较高固相浓度下 N_{JS} 随固相浓度的提高而增加较慢，在固相浓度很高(如 50%)时出现向下拐点。

3.3 固含率对固相浓度分布的影响

本工作测定了不同离底高度处的径向浓度分布，如图 7(a)所示。从图可以看出，固体颗粒在导流筒搅拌槽内的径向浓度分布是比较均匀的，与文献[12]得到的开式搅拌槽内的结论是一致的。为此，本工作的研究重点

主要针对轴向浓度分布。在临界离底悬浮转速下典型的轴向浓度分布如图 7(b)所示，从图可以看出，除了槽内上部靠近液面区域的固相浓度低于平均固相浓度外，其余区域接近于全槽平均浓度。全槽固相浓度分布的均匀性随固相浓度变化如图 8 所示，从图可以看出，随着固相浓度的增加，全槽固相浓度分布的均匀性改善，固相浓度的标准偏差减小，这一方面是由于固含率的增大导致 N_{JS} 提高，从而增加了槽内的液体循环速度，使固相浓度分布更均匀；另一方面，随着固含率的增大，如上所述，颗粒在密集状态下的沉降速度比单颗粒的小，这有利于维持颗粒的悬浮状态，导致固相浓度分布更均匀。

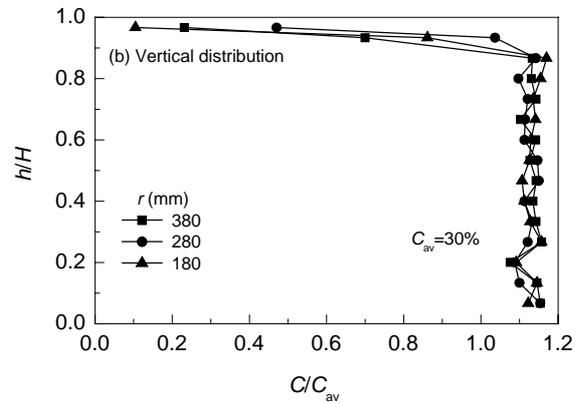
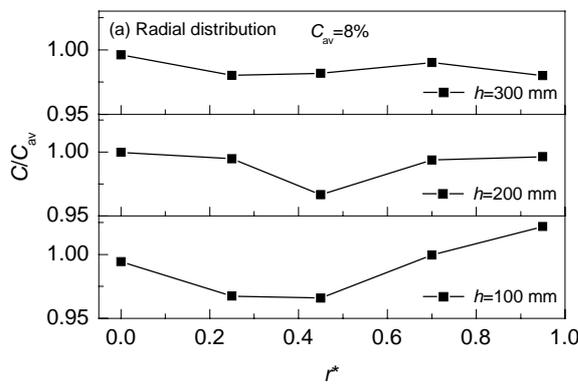


图 7 径向和轴向固相浓度分布

Fig.7 Radial and vertical distributions of solid concentrations

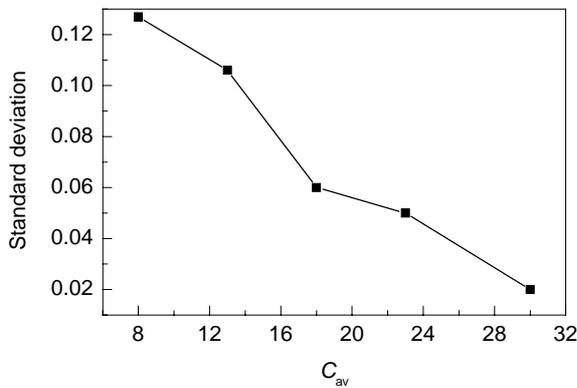


图 8 不同固相浓度下的标准偏差

Fig.8 Standard deviation under different solid concentrations

4 结论

在直径 0.8 m 的导流筒搅拌槽内，分别对单相液体的速度分布、固-液两相的固相浓度分布和离底悬浮特性进行了研究，得到如下的主要结论：

(1) 导流筒内外液相轴向速度远大于径向和切向速度，导流筒外壁附近存在一个与主体轴向流动方向相反的二次流区域。

(2) 搅拌槽的底部结构对固体颗粒的临界离底悬浮转速(N_{JS})有显著的影响，浅锥底的 N_{JS} 比平底的低 14% 以上。

(3) 槽内固相浓度分布的均匀性随固相浓度的增加而改善，标准偏差从固相浓度 8% 时的 0.127 降低到浓度为 30% 时的 0.02。

(4) N_{JS} 随固相浓度的增加而增加，但当浓度超过 50% 时， N_{JS} 略有降低。

符号表：

C	固体质量浓度 (kg/kg)	C_{av}	平均固体质量浓度 (kg/kg)
C_l	搅拌桨离底距离 (m)	C_D	导流筒底部离底距离 (m)
d_p	固体颗粒直径 (m)	D	搅拌桨直径 (m)
D_1	导流筒直径 (m)	h	离底距离 (m)
h_1	导流筒上缘距液面距离 (m)	H	导流筒高度 (m)
N	转速 (s^{-1})	N_Q	循环流量准数
N_{JS}	临界离底悬浮转速 (s^{-1})	Q	循环流量 (m^3/s)
r	离壁距离 (mm)	r^*	无因次半径
R	搅拌槽半径 (m)	T	搅拌槽直径 (m)
u	单颗粒沉降速度 (m/s)	u_s	颗粒沉降速度 (m/s)
V	实验测得速度 (m/s)	V^*	无因次流速
V_t	叶端线速度 (m/s)	ϕ	固相体积分数

下标

a 轴向

参考文献:

- [1] Oldshue J Y. 流体混合技术 [M]. 王英琛, 林猛流, 等译. 北京: 化学工业出版社, 1991. 302–308.
- [2] Mezaki R, Mochizuki M, Ogawa K. Engineering Data on Mixing [M]. Amsterdam: Elsevier Science, 2000. 569–597.
- [3] 永田进治. 混合原理与应用 [M]. 马继舜, 译. 北京: 化学工业出版社, 1991. 168–231.
- [4] 王凯, 冯连芳. 混合设备设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993. 233–253.
- [5] 绪淮, 周理. 液体搅拌 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1993. 74–80.
- [6] Landberg G G. Draft Tube Arrangement [P]. US Pat.: 3532327, 1970–10–06.
- [7] Weetman R J. Draft Tube Apparatus [P]. US Pat.: 4459030, 1984–06–10.
- [8] 汪洋, 徐春明, 高金森, 等. 液固环流反应器结构特性对固体流动的影响 [J]. 石油化工, 2003, 32(8): 682–685.
- [9] 肖建军, 包雨云, 黄雄斌, 等. 带导流筒搅拌槽中循环流量的实验研究 [J]. 华北工学院学报, 2003, 23(1): 25–29.
- [10] 马国华, 霍元素, 王英琛, 等. 固液悬浮体系中固相浓度测量的新方法—光电测量法 [J]. 化学工程, 1990, 19(1): 58–60.
- [11] Zwietering T N. Suspending Solid Particles in Liquid by Agitators [J]. Chem. Eng. Sci., 1958, 8(3/4): 244–249.
- [12] 陈道芳, 徐雷兴, 陈甘棠, 等. 固、液体系机械搅拌槽中颗粒悬浮特性的研究 [J]. 化学反应工程与工艺, 1992, 3(8): 44–53.

Characteristics of Fluid Flow and Particle Suspension in a Solid–Liquid Draft-tube Stirred Tank

CHEN Wen-min, HUANG Xiong-bin, GAO Zheng-ming

(College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The three-dimension velocity distribution of single liquid phase, solid concentration distribution and particle off-bottom suspension characteristics in the liquid–solid phases were systemically investigated in a draft-tube stirred tank of 0.8 m diameter. The results showed that the axial velocity of liquid phase was far larger than radial and tangential velocities inside and outside the draft tube. And there was a second circulation zone close to the outside wall of the draft tube. The shallow conical bottom leads to a critical just off-bottom suspension impeller speed (N_{JS}) at least 14% lower than that in the flat bottom. As expected, N_{JS} increased as the solid concentration increased. N_{JS} decreased slightly as the solid concentration exceeded 50%. The homogeneity of vertical solid concentration distribution was enhanced with the increase of solid concentration. The results are of importance to the optimization of industrial draft-tube stirred reactors.

Key words: draft-tube stirred tank; liquid velocity distribution; solid concentration distribution; critical just off-bottom suspension impeller speed